



## Analyse des dispositifs de contrôle des systèmes de chauffage équipés de radiateurs

## Introduction

À l'heure actuelle, la société est confrontée à des problèmes liés au secteur de l'énergie en raison du manque de ressources et de la nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre pour atténuer les effets du changement climatique. Selon la Directive 2012/27/UE [1], les bâtiments représentent 40 % de la consommation finale d'énergie et environ 50 % de celle-ci est due aux systèmes de chauffage. Dans le plan REPowerEU [2], l'Union européenne a récemment admis l'urgence d'une transition rapide vers un autre modèle énergétique pour que l'Europe puisse diversifier son approvisionnement en gaz, afin d'éliminer progressivement sa dépendance à l'égard des combustibles russes avant 2030. Une des méthodes adoptées consiste à doubler le rythme annuel de déploiement de pompes à chaleur (avec un déploiement prévu de 10 millions au cours des cinq prochaines années) [3]. En effet, la nouvelle directive relative à la performance énergétique des bâtiments (EPBD) vient d'approuver le retrait des systèmes de chauffage à base de combustibles fossiles dans l'Union européenne d'ici 2040 [4]. Compte tenu du fait que le niveau d'isolation du parc actuel des logements européen est faible et que ces derniers sont bien souvent chauffés avec des systèmes basés sur des radiateurs à haute température alimentés par une chaudière, il est nécessaire d'analyser la viabilité technique et économique de la mise en place d'une pompe à chaleur dans différentes situations (niveau d'isolation, type de climat, etc.), dans lesquelles le système de contrôle jouera un rôle fondamental pour améliorer l'efficacité et garantir le confort thermique des utilisateurs.

En France, les logements résidentiels peuvent bénéficier d'aides « coup de pouce », sous forme de primes de 3 000 € pour des travaux effectués individuellement, ce montant pouvant même être supérieur pour les foyers à revenus faibles et très faibles (jusqu'à 5 000 €), pour remplacer une chaudière à charbon, à fioul ou à gaz (hormis les chaudières à condensation) par des unités utilisant des énergies renouvelables, parmi lesquelles on retrouve la pompe à chaleur air-eau [5].

Cette étude a pour objectif de démontrer que le déploiement de systèmes de contrôle intelligents dans les installations de chauffage avec unités hydroniques contribue de manière efficace à augmenter la performance énergétique d'un bâtiment. Pour cela, nous avons mis au point un modèle de stratégies de contrôle multizone proposées par l'entreprise Airzone pour les systèmes hydroniques, avec le logiciel TRNSYS18 [6]. L'objectif est d'évaluer le potentiel d'un système de contrôle de la température indépendant dans chaque zone dans un bâtiment résidentiel équipé d'une installation avec une pompe à chaleur et des radiateurs à haute température. Les résultats sont ensuite comparés à différentes situations, le cas conventionnel le plus courant étant celui d'une chaudière à gaz et de radiateurs à haute température. L'étude analyse l'influence du type d'enveloppe thermique du bâtiment, des différents types de contrôle et de la zone climatique. Les conclusions comparent les résultats obtenus en matière d'économies d'énergie, de confort thermique et de viabilité économique.

## Description des conditions de chauffage et de contrôle

Nous proposons de comparer un système de chauffage basé sur des radiateurs à haute température comme unité terminale alimentés par deux systèmes de production différents : une chaudière et une pompe à chaleur. Par ailleurs, nous avons également considéré différents types de contrôle.

### 1| Système conventionnel : chaudière à gaz et radiateurs à haute température (CALD)

Il s'agit de l'installation la plus courante dans les logements anciens. La production d'eau chaude est à température constante et il n'est pas possible de contrôler les radiateurs. La chaudière à gaz conventionnelle fournit de l'eau chaude à une température fixe de 70 °C aux radiateurs situés dans chaque zone du logement. L'installation est réglée lors de la mise en service avec des vannes manuelles, mais il n'existe aucun type de contrôle de la vanne qui régule l'entrée du débit d'eau dans les radiateurs (figure 1).

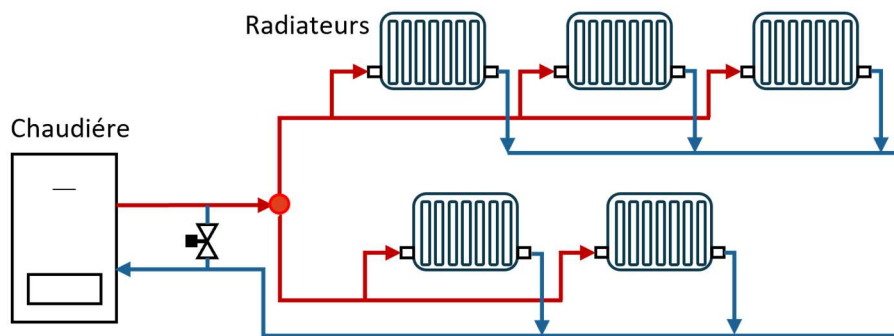


Figure 1. Système conventionnel : chaudière à gaz et radiateurs à haute température sans contrôle.

### 2| Système rénové, mais sans contrôle : pompe à chaleur à haute température (BDC)

La mesure encouragée dans le cadre de la rénovation du système de chauffage est le remplacement de la chaudière par une pompe à chaleur, en laissant les radiateurs comme unités terminales. Dans ce cas, les pompes à chaleur à haute température régulent la température de production d'eau chaude, afin de maintenir une température de consigne de 70 °C, sur la base de la courbe de chauffage de l'unité, qui modifie la température de consigne en fonction de la température extérieure et intérieure, comme indiqué sur la figure 2.

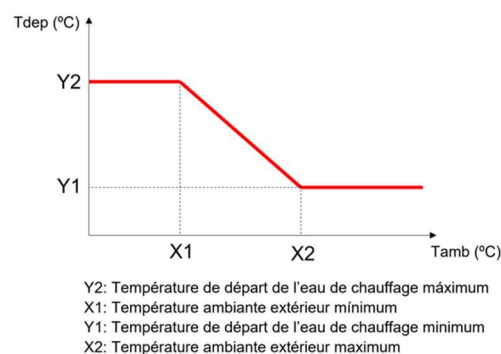


Figure 2. Courbe de comportement de la pompe à chaleur. Définition de la température de production en fonction de la température extérieure.

La plage de température extérieure dépend de la zone climatique dans laquelle l'unité est installée. La plage de température de production, elle, est déterminée pour éviter tout inconfort thermique dû à des courants d'air ou à la faible efficacité des réseaux de distribution. Par exemple, dans ce cas, nous avons considéré une température extérieure minimum et maximum entre -5 °C et 15 °C dans les trois villes analysées. Les températures de production minimum et maximum ont été définies entre 60 °C et 80 °C, pour que la température de production moyenne soit d'environ 70 °C.

Le système de contrôle des unités terminales est appelé « système sans régulation par zone », car il n'y a qu'un contrôle ON/OFF sur la pompe de circulation d'eau en fonction de la température mesurée par le thermostat situé dans une zone du logement (figure 3).

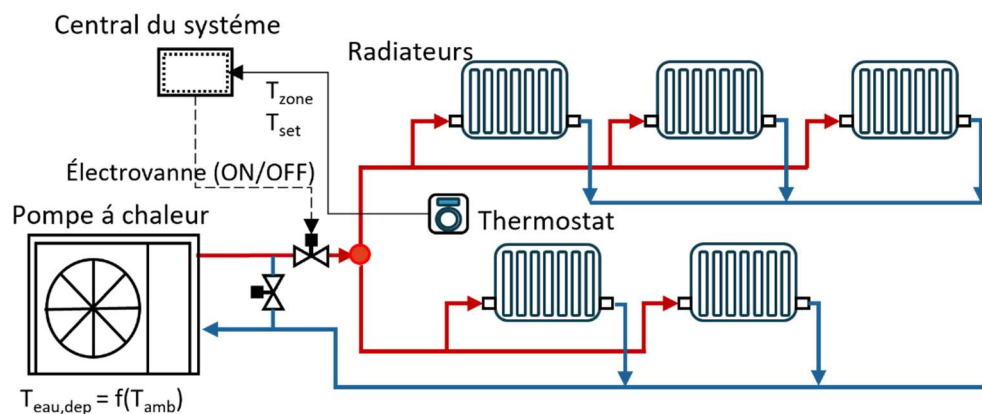


Figure 3. Système rénové : pompe à chaleur et radiateurs à haute température sans régulation par zone

La figure 4 montre comment la pompe se met en marche quand la différence de température entre la température mesurée par la sonde de la tête du radiateur ( $T_z$ ) et la température de consigne définie ( $T_{set}$ ) est de 0,5 °C.

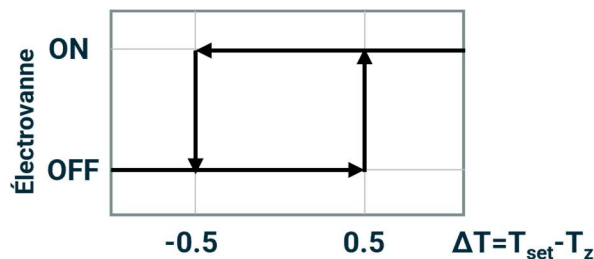


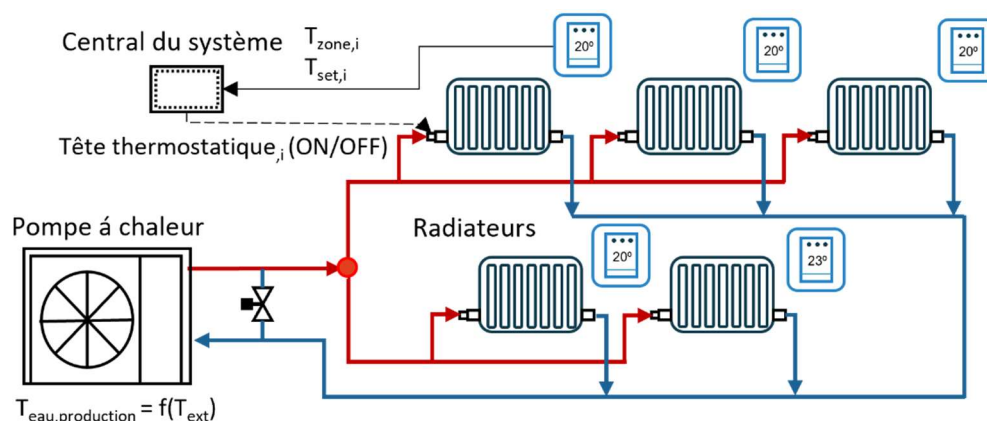
Figure 4. Contrôle ON/OFF de la vanne en fonction de l'écart de température entre la température de consigne et la température de la zone principale.

### 3| Système rénové avec contrôle multizone Airzone : pompe à chaleur à haute température et radiateurs (AIRZ)

L'importance et la nécessité d'incorporer des systèmes de contrôle du chauffage sont de plus en plus évidentes, car il s'agit d'un élément essentiel pour améliorer l'efficacité des bâtiments. La norme ISO52120 [7] régit l'utilisation des systèmes de contrôle du chauffage dans les bâtiments et établit notamment l'obligation de disposer d'un système de régulation par zone, c'est-à-dire de contrôler individuellement les températures dans chaque zone du bâtiment, comme élément fondamental pour assurer le confort thermique et l'efficacité de l'installation.

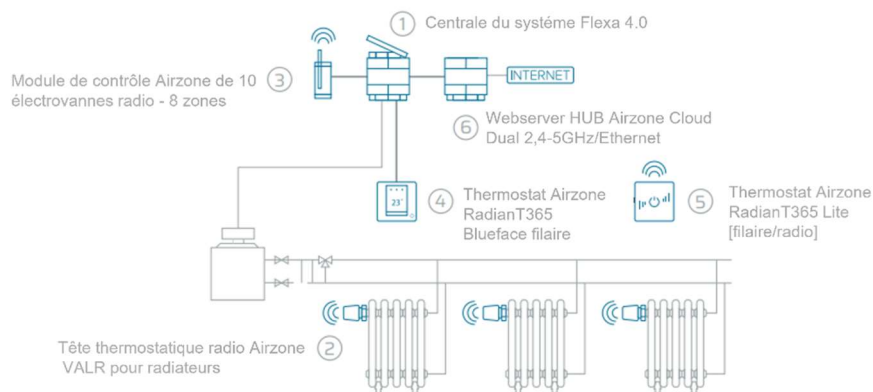
Dans ce cas, la température de production de la pompe à chaleur est nécessaire comme décrit dans le cas précédent (figure 2), pour tenir compte des conditions extérieures.

Les unités terminales sont dotées d'une commande sur chaque vanne située à l'entrée des radiateurs pour ouvrir ou fermer le passage de l'eau en fonction de la différence de température entre la température de consigne de la zone et la température mesurée par le thermostat installé à cet endroit, qui communique à la platine centrale la situation thermique de ladite zone. Le fait d'installer un thermostat permet d'éviter le problème de la sonde de température située dans la tête du radiateur, dont la lecture de la température de l'air de la zone est influencée par la proximité du radiateur, ce qui provoque un dysfonctionnement du système. Cela permet d'avoir un contrôle indépendant de la température dans chaque zone afin d'assurer le confort individuel et d'adapter la consommation de la pompe à chaleur aux besoins thermiques de chaque zone (figure 5).



**Figure 5.** Système rénové : pompe à chaleur et radiateurs à haute température avec contrôle multizone

Retrouvez ci-après une description plus détaillée de l'installation des éléments de contrôle. La figure 6 montre un schéma des différents éléments de contrôle de l'installation.



**Figure 6.** Schéma d'un système de contrôle multizone avec radiateurs et pompe à chaleur.

Le système Innobus Pro8 assure un contrôle multizone pour radiateurs. Les têtes thermostatiques radio Airzone contrôlent la quantité de chaleur émise par le radiateur dans chaque zone de la maison, ce qui garantit la régulation de la température de confort déterminée par l'utilisateur.

## Saisie des modèles dans TRNSYS

Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel TRNSYS18, référence en matière de recherche d'installations thermoénergétiques. Cette plateforme de calcul s'est servie des modèles mathématiques de l'ensemble des systèmes de chauffage définis à la section précédente. Le système de contrôle décrit dans la section 2 a été modélisé grâce à des équations mathématiques pour former un modèle propre permettant d'interagir avec le bâtiment et le reste des éléments de l'environnement de la simulation (figure 7).

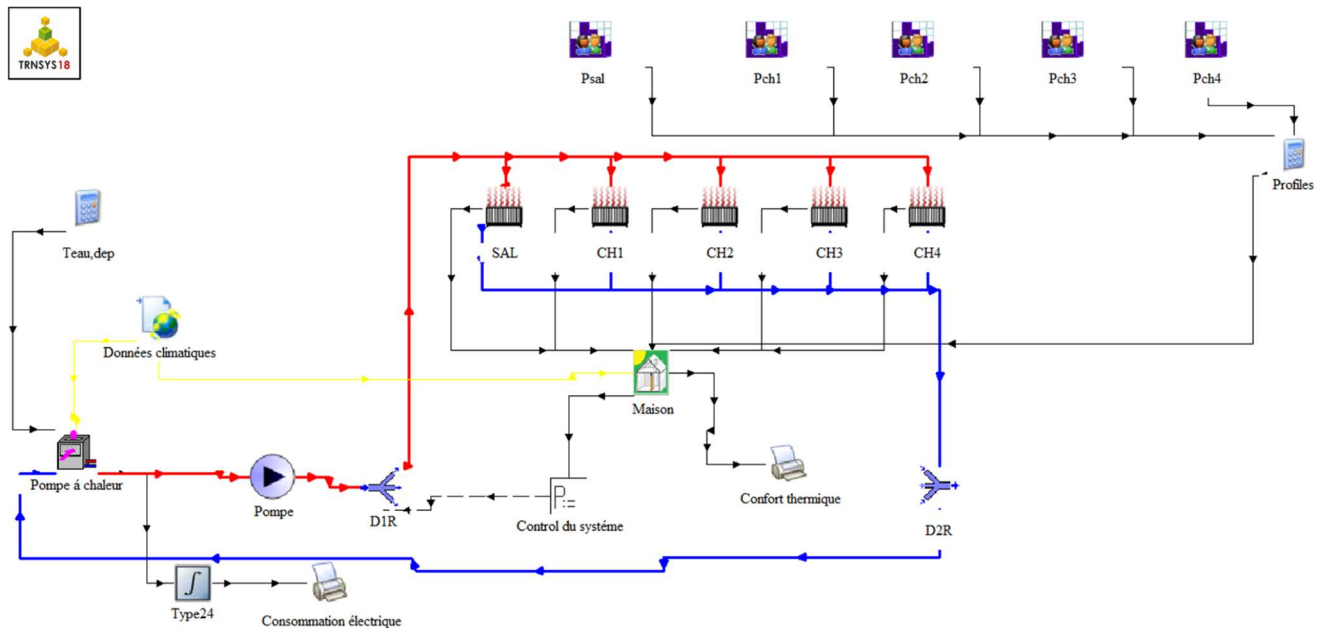


Figure 7. Installation simplifiée du système de contrôle dans Trnsys.

Il convient de noter que le modèle avec pompe à chaleur a été mis au point sur la base des courbes de fonctionnement typiques spécifiées dans les catalogues des fabricants. Le modèle permet en outre d'incorporer la modification de l'efficacité de la machine (COP) due à la fraction de charge.

## Résultats. Étude de cas

Les résultats de l'étude analysent la pertinence du système de contrôle hydronique d'Airzone, par rapport à la solution de plancher chauffant-rafraîchissant proposée, du point de vue du confort thermique et de la consommation d'énergie. Nous avons également réalisé une étude économique, afin d'obtenir une évaluation de la viabilité technico-économique.

### Étude de cas

Nous avons pris comme hypothèse un logement individuel, d'une superficie totale 120 m<sup>2</sup>, simulé dans les villes de Nantes y Marseille. Le logement comporte 5 zones chauffées : Salon-cuisine (SAL), Chambre 1 (CH1) au rez-de-chaussée, et Chambre 2 (CH2), Chambre 3 (CH3) et Chambre 4 (CH4) à l'étage (figure 8).

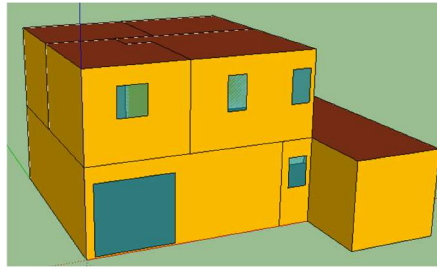


Figure 8. Plan du logement. Représentation en 3D.

Le logement a été simulé pour trois villes caractéristiques françaises : Paris, Nantes et Strasbourg, par ordre de sévérité climatique en hiver. Les températures minimales et maximales pendant les mois d'hiver de chacune d'entre elles sont représentées dans le tableau 1 [8].

|                           |            | JAN | FÉV | MAR | AVR | OCT | NOV | DÉC |
|---------------------------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Température minimale (°C) | Nantes     | 3   | 3   | 5   | 7   | 9   | 6   | 4   |
|                           | Paris      | 2   | 2   | 4   | 6   | 8   | 5   | 3   |
|                           | Strasbourg | -1  | 0   | 2   | 5   | 7   | 3   | 1   |
| Température maximale (°C) | Nantes     | 9   | 10  | 13  | 15  | 17  | 12  | 9   |
|                           | Paris      | 7   | 8   | 12  | 15  | 16  | 11  | 7   |
|                           | Strasbourg | 5   | 6   | 11  | 15  | 15  | 9   | 5   |

Tableau 1. Températures maximales et minimales moyennes pendant les mois de chauffage.

Nous avons considéré trois types d'isolation du logement représentant différentes conditions de charge thermique : une isolation élevée typique des nouveaux bâtiments définie par les réglementations en vigueur (AIS3), un bâtiment à isolation moyenne (AIS2) et un bâtiment à faible isolation (AIS1). Les propriétés des éléments isolants des bâtiments sont déterminées à partir du coefficient global de transfert de chaleur de chaque élément de construction (U), comme indiqué dans le tableau 2.

| Surface       | AIS1 | AIS2 | AIS3  |
|---------------|------|------|-------|
| Mur extérieur | 1,14 | 0,56 | 0,18  |
| Mur intérieur | 0,88 | 0,60 | 0,215 |
| Plafond       | 0,88 | 0,60 | 1     |
| Sol           | 0,40 | 0,24 | 0,26  |
| Toit          | 1,10 | 0,60 | 0,22  |
| Fenêtre       | 5,68 | 2,90 | 1,3   |

Tableau 2. Caractéristiques thermiques de l'enveloppe du logement (U en W/m<sup>2</sup>K).

Étant donné que dans un système multizone la charge thermique des zones inoccupées n'est pas combattue, il est essentiel de déterminer le profil d'utilisation de chaque pièce (figure 9).

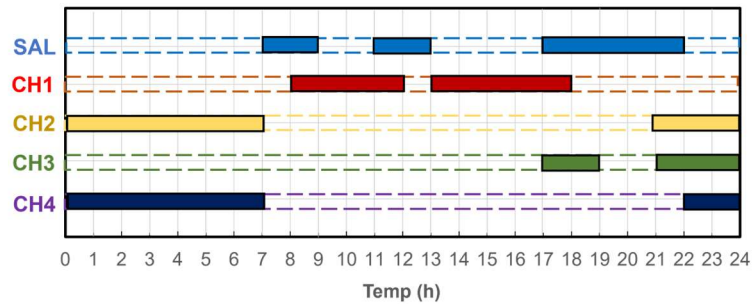


Figure 9. Profil d'occupation du logement.

On estime que pendant les heures d'inoccupation, les radiateurs continuent à fonctionner, mais avec des températures de consigne plus basses, afin d'éviter un chauffage excessif. La température de consigne des zones chauffées est de 20 °C, et de 18 °C lorsque ces zones ne sont pas occupées. Les unités ont donc été dimensionnées en fonction des charges thermiques des zones, afin de s'assurer que le système puisse garantir le confort de l'utilisateur pendant la saison de chauffage.

Les unités de production sélectionnées sont une chaudière à gaz conventionnelle de type Altherma HT (High Temperature) du fabricant Daikin [9] adaptée à une utilisation avec des radiateurs à haute température.

## Résultats

Les données obtenues grâce aux simulations permettent de comparer les trois scénarios de chauffage et de contrôle décrits dans la section 2 (CALD, BDC et AIRZ), en rapprochant les résultats comme décrit ci-dessous :

- 1| CALD-AIRZ. Dans le cadre de la rénovation d'un logement, on installe une pompe à chaleur à haute température pour remplacer la chaudière, et le système de contrôle Airzone. Ce cas est analysé pour les trois villes, bien que la chaudière ne soit envisagée que dans les logements ayant des niveaux d'isolation faibles (AIS1) et moyens (AIS2), car pour le niveau d'isolation des logements récents AIS3), nous n'avons pas pris en considération l'installation d'une nouvelle chaudière.
- 2| BDC-AIRZ. Nous avons fait la comparaison entre une installation avec une pompe à chaleur et un système de contrôle Airzone et une installation avec une pompe à chaleur sans régulation par zone. Ce cas est analysé pour les trois villes étudiées et les trois niveaux d'isolation du logement.

## Confort thermique

Les résultats relatifs au confort ne portent pas exclusivement sur la comparaison de la température de la zone. Ils évaluent également le confort selon la norme UNE EN ISO 7730:2006 [10].

Paramètres de confort : PMV et PPD

On effectue une comparaison des paramètres PPD et PMV d'un système multizone et d'un système sans régulation par zone dans des conditions standard de confort tenant compte de l'habillement, du métabolisme et de la vitesse relative de l'air.



Le PMV (*predicted mean vote*) est un indice qui reflète la valeur moyenne des votes d'un grand nombre de personnes sur une échelle de sensation thermique de 7 niveaux, lorsqu'elles sont soumises à différents environnements thermiques. L'échelle se base sur l'équilibre thermique du corps humain (figure 10).

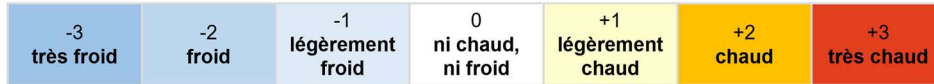


Figure 10. Échelle de PMV

Le calcul du PMV permet d'estimer la sensation thermique du corps humain dans son ensemble à partir de l'estimation ou de la mesure des paramètres qui conditionnent l'équilibre thermique global du corps : taux métabolique du sujet, isolation des vêtements, température de l'air, température moyenne rayonnante, vitesse relative de l'air et humidité de l'air.

L'indice PPD (*predicted percentage dissatisfied*) fournit des informations sur l'inconfort ou l'insatisfaction thermique en prédisant quantitativement le pourcentage de personnes susceptibles d'avoir trop chaud ou trop froid dans un environnement donné. Il est possible d'obtenir le PPD à partir du PMV.

Selon la norme UNE ENE ISO 7730:2006, les valeurs recommandées pour assurer un confort thermique global à 90 % des utilisateurs sont indiquées dans le tableau 3.

| CLASSE | PPD (%) | PMV              |
|--------|---------|------------------|
| A      | <6      | -0,2 < PMV < 0,2 |
| B      | <10     | -0,5 < PMV < 0,5 |
| C      | <15     | -0,7 < PMV < 0,7 |

Tableau 3. Classes d'environnement thermique selon le PPD et le PMV.

À l'heure actuelle, les exigences de confort dans les bâtiments sont élevées et l'objectif est d'atteindre la catégorie B, en particulier dans les bâtiments efficaces et durables qui obtiennent les certifications BREEAM ou LEED [11]. La figure 11 montre une comparaison du pourcentage d'heures pendant lesquelles les conditions de confort sont remplies, tant dans la zone principale où est installé le thermostat (Salon), que dans les autres zones thermiques du logement (Zones). Nous comparons ensuite les résultats des trois études de cas : chaudière (CAL), pompe à chaleur sans régulation multizone (BDC) et pompe à chaleur avec système de contrôle Airzone (AIRZ<sup>A</sup>), pour les trois villes étudiées (Nantes, Paris et Strasbourg) et, pour chacune d'elles, les trois isolations de logement proposées (AIS1, AIS2, AIS3).

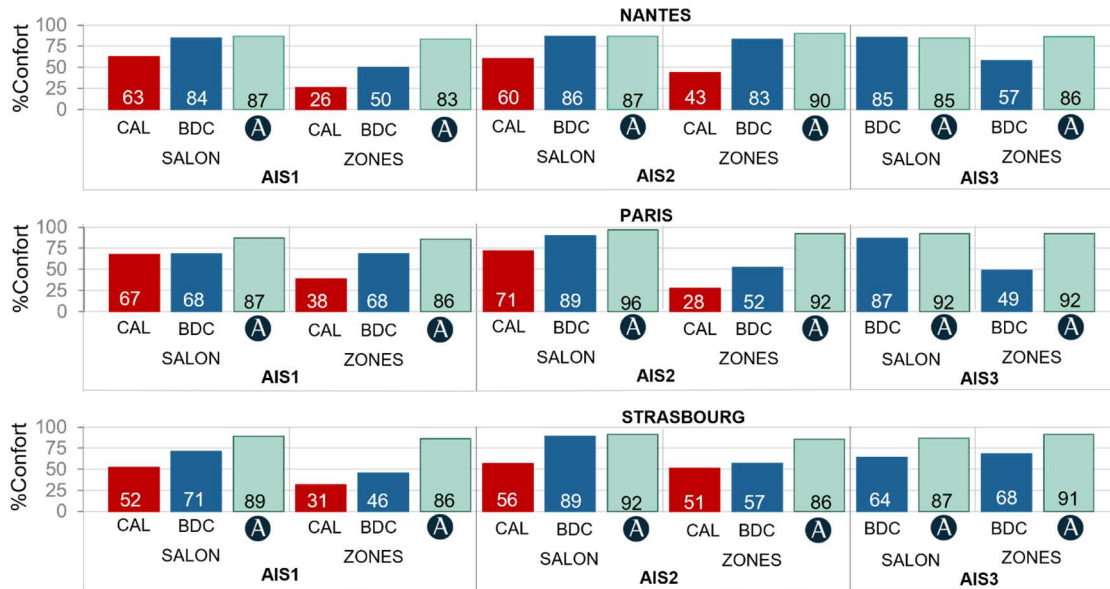


Figure 11. Comparatif des systèmes, pour comparer les catégories de confort

D'une manière générale, on constate que, dans tous les cas, les pourcentages de confort obtenus dans le salon sont supérieurs à ceux des autres zones du logement. De plus, dans les cas avec pompe à chaleur et contrôle (BDC et AIRZ), quand il existe un contrôle, on obtient des pourcentages plus élevés que dans le cas de la chaudière (CAL). À titre d'exemple, on constate qu'avec la chaudière les pourcentages de confort sont d'environ 50 à 70 % dans le salon, tandis que pour les cas équipés d'un contrôle avec pompe à chaleur, les pourcentages sont supérieurs et atteignent 85 % et 90 %.

En ce qui concerne le contrôle du confort dans le reste des zones du logement, on constate que les résultats obtenus avec le contrôle multizone d'Airzone (AIRZ) sont nettement supérieurs dans le reste des zones à ceux des cas sans régulation par zone (BDC) et équipé d'une chaudière (CAL). Cela est dû au réglage des vannes de chaque radiateur en fonction de la régulation individuelle des températures dans chaque zone du logement, ce qui assure le confort thermique. Les pourcentages de confort avec le contrôle multizone vont de 86 à 92 % pour le reste des zones, tandis que sans régulation par zone, le pourcentage moyen varie de 55 à 60 % et, dans le cas de la chaudière, il diminue à 25-30 % en raison de l'absence de tout type de contrôle. Dans les cas BDC et CAL, sans contrôle sur les autres zones, les résultats obtenus en termes de PMV sont supérieurs à 1,5-2, ce qui suppose une surchauffe inutile de la maison et donc une consommation d'énergie plus élevée, comme analysé dans la section suivante.

## Consommation d'énergie et étude environnementale

### Consommation d'énergie électrique de la pompe à chaleur

Après évaluation du confort thermique du bâtiment, l'étape suivante consiste à comparer la consommation électrique des deux systèmes et à réaliser l'étude environnementale. L'objectif est de démontrer que la stratégie de contrôle du système multizone est plus efficace du point de vue de la consommation d'énergie, en raison de sa capacité à satisfaire efficacement les besoins thermiques de chaque zone, ce qui améliore le rendement du système production.

Nous allons tout d’abord comparer le cas BDC-AIRZ et analyser la consommation d’énergie électrique de la pompe à chaleur dans les trois villes et pour les trois niveaux d’isolation du logement (figure 12). L’objectif est d’évaluer le système de contrôle multizone en ce qui concerne les économies d’énergie (indiqué en pourcentage sur la figure).

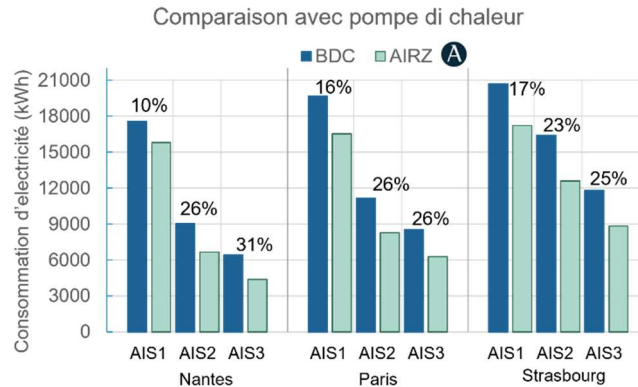


Figure 12. Comparatif de consommation électrique pour les cas avec la pompe à chaleur

Les résultats de la consommation d’énergie du logement sont conformes aux moyennes indiquées par l’Institut national des statistiques et des études économiques dans son étude « Les émissions directes de CO<sub>2</sub> des ménages selon leur localisation » [12] et selon le type de pompe à chaleur à haute température sélectionnée et les heures de fonctionnement par an de l’équipement.

Dans tous les cas comparés, on constate que la consommation électrique d’une installation équipée d’une pompe à chaleur et du système de contrôle multizone d’Airzone est inférieure à celles sans régulation par zone, où le système est contrôlé à partir de la température mesurée dans le salon. Les économies d’énergie vont de 10 à 26 %, selon le type de climat et le niveau d’isolation du logement. Dans tous les cas, on observe que dans les logements mieux isolés, la consommation d’énergie est plus faible. On constate également qu’à Strasbourg, la ville la plus froide, la consommation d’énergie est plus élevée.

## Émissions de CO<sub>2</sub>

Afin d’établir une comparaison avec le cas de la chaudière, nous avons décidé de faire une analyse comparative des émissions de CO<sub>2</sub> des trois études de cas, étant donné que la chaudière consomme du gaz naturel, ce qui n’est donc pas directement comparable à la consommation électrique de la pompe à chaleur. Pour calculer les émissions de CO<sub>2</sub>, nous avons pris en compte les coefficients de conversion d’énergie finale en émissions de CO<sub>2</sub> donnés selon le Bilan GES de l’Ademe, méthode dite « saisonnalisée par usage » [13]. Ces coefficients sont de 49 g de CO<sub>2</sub>/kWh pour la pompe à chaleur et de 227 g de CO<sub>2</sub>/kWh pour la chaudière à gaz.

La figure 13 présente l’étude environnementale avec la comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> des trois systèmes de chauffage proposés (CALD, BDC et AIRZ), dans les trois villes et avec les trois niveaux d’isolation du logement. En outre, les pourcentages de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> obtenus grâce à l’installation de la pompe à chaleur sont indiqués, tout d’abord pour une installation sans régulation par zone par rapport à la chaudière, et ensuite, avec une pompe à chaleur et le système de régulation Airzone (AIRZ). Par ailleurs, le pourcentage de réduction obtenu grâce à l’installation d’un système de contrôle multizone augmente dans tous les cas et plus le niveau d’isolation du logement est élevé, ainsi que

pour les climats plus froids. Pour la ville de Strasbourg, on obtient des économies de 34 et 40 % d'émissions de CO<sub>2</sub> par rapport aux installations équipées d'une chaudière pour les niveaux d'isolation AIS1 et AIS2, respectivement.

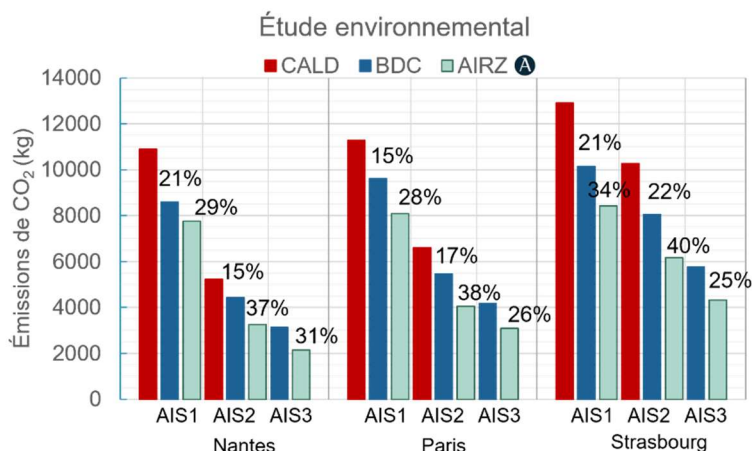


Figure 13. Étude environnementale. Comparatif des émissions de CO<sub>2</sub>

### Étude économique. Amortissement du système de contrôle Airzone.

L'analyse économique se base sur une comparaison entre l'investissement initial dans l'unité de production et le système de contrôle, et les coûts de fonctionnement entraînés par la consommation du système de chauffage obtenus dans la simulation. Sur la base de ces données, nous avons calculé le temps nécessaire pour amortir le système de contrôle d'Airzone. L'analyse est effectuée pour les cas suivants : CALD-AIRZ (remplacement de la chaudière par la pompe à chaleur avec système de contrôle multizone d'Airzone) et BDC-AIRZ (comparaison des cas avec la pompe à chaleur avec ou sans le système de régulation par zone d'Airzone). Le tableau 4 présente le coût des unités, obtenu à partir des catalogues des fabricants, pour le système conventionnel et le système multizone d'Airzone.

| Coûts (€)   | Système conventionnel | Airzone       |
|---|-----------------------|---------------|
| PAC air-eau [9]   | 8 100                 | 8 100         |
| Contrôle conventionnel                                    | 200                   |               |
| Contrôle Airzone  | -                     | 1 908         |
| Platine centrale AZCE8CB1DIN Innobus Pro8                 | -                     | 188           |
| Module de contrôle AZCE8CM1VALR de 10 électrovannes radio | -                     | 112           |
| Thermostat BlueZero                                       | -                     | 253           |
| 4 Thermostats Lite  | -                     | 744           |
| 5 Têtes thermostatiques radio Airzone VALR                | -                     | 290           |
| Webserver Hub Airzone Cloud Dual 2,4-5 G – Ethernet       | -                     | 304           |
| <b>Total</b>  | <b>8 300</b>          | <b>10 107</b> |

Tableau 4. Coût initial des systèmes.

Le tableau 4 montre que le coût initial du système multizone d’Airzone est plus élevé que celui du système conventionnel, en raison du coût des éléments du système de contrôle. Cependant, comme le montre le tableau 5, les années d’amortissement du retour sur investissement pour les différentes études de cas sont comprises entre 1,9 et 5,3 ans, des périodes très raisonnables considérées comme économiquement viables. Les coûts de fonctionnement ont été calculés pour les comparatifs avec la pompe à chaleur (BDC-AIRZ) à partir des consommations annuelles électriques de celle-ci obtenues à la figure 12 et du coût du kWh pour l’alimenter, estimé à une moyenne de 0,23 €/kWh au cours des derniers mois, en raison des grandes fluctuations des prix [14]. D’autre part, pour les comparatifs avec la chaudière (CALD-AIRZ), un prix moyen de 0,1045 €/kWh a été utilisé pour estimer le coût du gaz naturel en France [15].

| Isolation  | AIS1      |          | AIS2      |          | AIS3     |
|------------|-----------|----------|-----------|----------|----------|
|            | CALD-AIRZ | BDC-AIRZ | CALD-AIRZ | BDC-AIRZ | BDC-AIRZ |
| Ville/Cas  |           |          |           |          |          |
| Nantes     | 3,0       | 4,3      | 5,3       | 3,1      | 3,7      |
| Paris      | 3,0       | 2,4      | 4,1       | 2,6      | 3,3      |
| Strasbourg | 2,3       | 2,1      | 2,6       | 1,9      | 2,5      |

Tableau 5. Années d’amortissement selon les cas analysés

Comme on peut le constater, plus les conditions climatiques sont extrêmes, plus les économies réalisées sont importantes et plus les délais de retour sur amortissement sont courts. Nous tenons à souligner que dans 50 % des cas étudiés, la période d’amortissement est inférieure à trois ans. Par ailleurs, il est important de souligner que le type de logement, bien qu’ayant une certaine influence sur les données obtenues, n’est pas déterminant et que l’investissement est rentable pour les logements avec différents niveaux d’isolation.

## Conclusions

Cette étude analyse en détail le comportement du système de contrôle multizone de radiateurs alimentés par une pompe à chaleur Airzone pour remplacer et améliorer le système de chauffage d’un logement résidentiel. Cette solution est comparée à deux systèmes différents : une chaudière au gaz naturel dans une installation sans contrôle des radiateurs, et une pompe à chaleur avec un système sans régulation par zone, contrôlé par la surveillance de la température dans une pièce du logement.

Les conclusions de l’étude décrivent les principaux avantages obtenus dans les différents cas comparés en ce qui concerne le confort thermique, la consommation électrique, les émissions de CO<sub>2</sub>, et proposent une analyse économique permettant d’évaluer la période d’amortissement du système de contrôle. Les différentes conclusions sont les suivantes :

1. le système de contrôle multizone commande la température de chaque zone d’un logement de manière indépendante, ce qui garantit un pourcentage d’heures de confort moyen de 86 à 92 %, avec des valeurs de confort thermique très favorables pour les utilisateurs du logement. Ce système est comparé à un système conventionnel ne comportant qu’un seul thermostat dans une zone principale pour réguler le fonctionnement de l’installation, ce qui implique un chauffage excessif dans les autres zones, avec des pourcentages de confort qui baisse à 55-60 % dans le cas de la pompe à chaleur et de 25-30 % avec la chaudière.

2. Nous avons également évalué l'influence du système de contrôle multizone avec pompe à chaleur en ce qui concerne la consommation électrique. Les économies d'énergie vont de 10 à 26 %, selon le type de climat et le niveau d'isolation du logement.
3. En ce qui concerne l'étude environnementale, l'augmentation du pourcentage de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est plus importante avec l'installation d'un système de contrôle multizone, et plus le niveau d'isolation du logement est élevé, ainsi que pour les climats plus froids.
4. Bien qu'il soit nécessaire de réaliser un investissement au départ dans le système de contrôle, l'étude économique montre des délais d'amortissement raisonnables et considérés comme économiquement viables, de 1,9 à 5,3 ans. Plus les conditions climatiques sont extrêmes, plus les économies sont importantes et plus les délais de retour sur amortissement sont courts. Nous tenons à souligner que dans 50 % des cas étudiés, la période d'amortissement est inférieure à trois ans.

## Références

- [1] Commission européenne. Directive 2012/27/UE du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique. Journal officiel des Communautés européennes (2012), L 315/1.
- [2] Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions REPowerEU : Action européenne commune pour une énergie plus abordable, plus sûre et plus durable. Strasbourg, le 08/03/2022.
- [3] IEA (2022), L'avenir des pompes à chaleur (en anglais), IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>, Licence : CC BY 4.0
- [4] Rénovation. Les aides financières en 2022. Agence de la Transition Écologique (ADEME). 2022.
- [5] Commission européenne, Directive (UE) 2023/1791 du Parlement européen et du Conseil du 13 septembre 2023 relative à l'efficacité énergétique et modifiant le règlement (UE) 2023/955 (refonte). 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023L1791>
- [6] TRNSYS <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>. (Consulté le 28/12/23).
- [7] EN 52120-1 Performance énergétique des bâtiments - Contribution de l'automatisation, du contrôle et de la gestion des bâtiments - Partie 1 : Cadre général et procédures
- [8] <https://es.weatherspark.com>
- [9] Catalogue de chauffage Daikin 2022.  
[https://www.daikin.be/fr\\_be/installateurs/support-technique/brochures.html](https://www.daikin.be/fr_be/installateurs/support-technique/brochures.html)
- [10] UNE-EN 15377. Systèmes de chauffage dans les bâtiments. Conception des systèmes de chauffage par le sol, le mur et le plafond. Octobre 2008.
- [11] BRE, BREEAM offices 2008 manuel d'évaluation, BREEAM. Watford : BRE Global Ltd. ; 2010.
- [12] Jean Cavailhès, Mohamed Hilal. Les émissions directes de CO<sub>2</sub> des ménages selon leur localisation. Le Point sur (Commissariat Général au Développement Durable), 2012, 137, pp.1-4. hal-02642357.

- [13] <https://www.economiedenergie.fr/les-emissions-de-co2-par-energie/>
- [14] Eurostat. Prix de l'électricité par type d'utilisateur  
<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=fr>
- [15] <https://www.hellowatt.fr/contrat-gaz-naturel/prix-gaz>